



## Analyse dosimétrique d'une chambre réverbérante à brassage de modes dans la bande 60 GHz.

Abdou Khadir Fall, Philippe Besnier, Christophe Lemoine, Maxim Zhadobov,  
Ronan Sauleau

### ► To cite this version:

Abdou Khadir Fall, Philippe Besnier, Christophe Lemoine, Maxim Zhadobov, Ronan Sauleau. Analyse dosimétrique d'une chambre réverbérante à brassage de modes dans la bande 60 GHz.. 18ème colloque et expositions internationale sur la compatibilité électromagnétique (CEM 2016), Jul 2016, Rennes, France. pp.388-393. hal-01345767

**HAL Id: hal-01345767**

**<https://hal.science/hal-01345767>**

Submitted on 19 Jul 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Analyse Dosimétrique d'une Chambre Réverbérante à Brassage de Modes dans la Bande 60 GHz

A. K. Fall<sup>1</sup>, P. Besnier<sup>1</sup>, C. Lemoine<sup>1</sup>, M. Zhadobov<sup>2</sup>, R. Sauleau<sup>2</sup>

(1) : IETR, UMR CNRS 6164 - INSA de Rennes, Département Antennes et Dispositifs Hyperfréquences  
20 av. des Buttes de Coësmes, 35708 Rennes, France (e-mail : abdou.fall@insa-rennes.fr).

(2) : IETR, UMR CNRS 6164 - Université de Rennes 1, Département Antennes et Dispositifs Hyperfréquences  
263 av. du Général Leclerc, 35042 Rennes, France.

**Résumé.** Nous proposons dans cette communication une nouvelle procédure de calibrage d'une chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM) dans la bande 60 GHz pour des applications en bioélectromagnétisme. Cette approche est basée sur des mesures de température par caméra infrarouge (IR) à la surface d'un fantôme parallélépipédique constitué essentiellement d'eau. Un modèle analytique permettant de calculer le gradient de la température sur le fantôme a été développé. Les mesures d'élévation de température sont en accord avec le modèle théorique. Deux approches différentes sont ensuite utilisées pour l'évaluation du débit d'absorption spécifique.

## I. INTRODUCTION

Au cours des dix dernières années, les chambres réverbérantes à brassage de modes ont fait l'objet d'études comme moyen d'exposition pour l'analyse de l'interaction des ondes électromagnétiques (EM) avec le vivant [1], [2], [3]. La chambre réverbérante (CR) offre quelques spécificités comparée à d'autres moyens d'exposition plus conventionnels (cellule TEM, guide d'onde, etc.). Dans une CR, l'animal exposé baigne dans un champ EM statistiquement isotrope et uniforme, indépendamment de sa position dans le volume utile de la chambre. L'animal pouvant se déplacer librement, les facteurs de stress sont limités par rapport à une exposition où il est contraint à l'immobilisation. Plusieurs approches sont proposées dans la littérature scientifique pour l'évaluation du débit d'absorption spécifique (DAS) sur un fantôme (ou animal) exposé en CR.

Dans cette communication, nous proposons de calibrer l'exposition dans une CR à partir de mesures de température à l'aide d'une caméra IR, sur un fantôme diélectrique de forme parallélépipédique. L'accroissement de la température est décrit par un modèle analytique. Cette approche permet de déterminer le gradient de la température sur le fantôme dans une CR idéale. Les relevés expérimentaux de température permettent de confirmer (ou non) le bon fonctionnement de la CR et le choix du processus de brassage de modes. De plus les mesures de température permettent de quantifier le DAS.

## II. PROCÉDURE DE CALIBRAGE

Le schéma de principe de la mesure de température par caméra IR sur un fantôme diélectrique exposé à un champ diffus en CR est illustré en figure 1.

Le fantôme baigne dans un champ EM généré par une source millimétrique positionnée à l'extérieur de la CR. Le champ EM est transmis à la CR via un guide d'onde ouvert utilisé comme élément rayonnant. Le brassage fréquentiel est utilisé comme processus de brassage de modes. Les mesures thermiques sont effectuées par une caméra IR à travers une interface spécifique fabriquée à cet effet. Les étapes de la procédure de calibrage de la CR que nous proposons sont synthétisées dans un diagramme (cf Fig. 2). Celui-ci est composé de 7 étapes :

- 1) Choix d'un fantôme diélectrique adéquat pour étudier les interactions ondes-vivant ;
- 2) Évaluation de la surface équivalente moyenne d'absorption (SEMA) du fantôme ;
- 3) Évaluation du coefficient de qualité de la chambre chargée et de la densité de puissance ;
- 4) Mise en place du modèle analytique par la résolution de l'équation de la chaleur ;
- 5) Mesure du gradient de la température à la surface du fantôme à l'aide de la caméra IR ;
- 6) Comparaison du gradient de la température expérimental à celui issu du modèle théorique ;
- 7) Détermination du DAS, à condition que l'étape 6 soit validée.

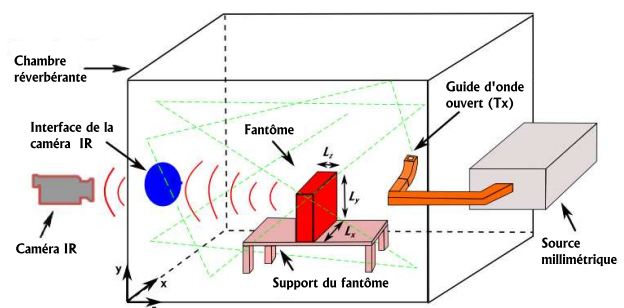


Fig. 1. Représentation schématique de la mesure de température par caméra IR sur un fantôme exposé dans une CRBM.

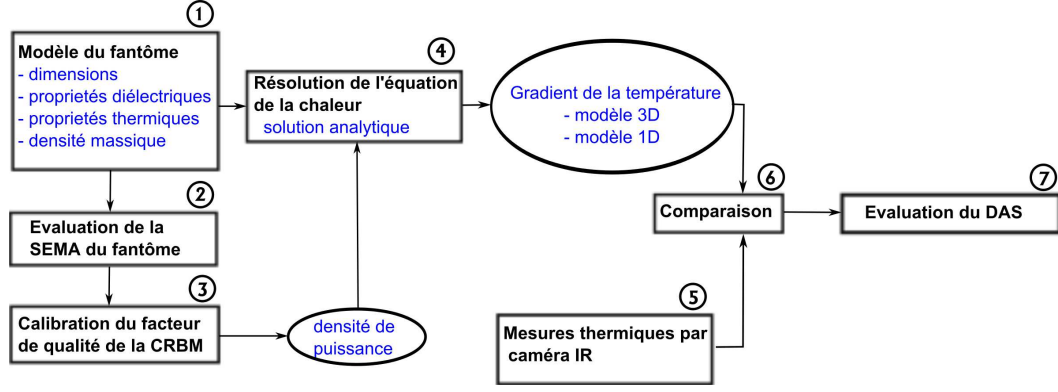


Fig. 2. Les différentes étapes de la procédure proposée de calibrage d'une CRBM millimétrique.

### III. ÉVALUATION DE LA DENSITÉ DE PUISSANCE DE LA CRBM EN CHARGE

#### III.1. Description du fantôme

Un fantôme diélectrique constitué essentiellement d'eau distillée avec une concentration de 4 % d'agar est utilisé dans notre analyse. Les propriétés diélectriques du fantôme sont très proches de celles de l'eau pure du fait de la concentration très élevée en eau ; elles sont parfaitement décrites par le modèle de Debye avec un seul temps de relaxation [4]. Les propriétés diélectriques et thermo-physiques du fantôme sont données en Table 1.

Table 1. Propriétés diélectriques [4] et thermo-physiques [5] du fantôme.

|  |          |
|--|----------|
| Permittivité complexe $\varepsilon^*$                              | 12-j19,7 |
| Conductivité thermique $k_t$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 0,66     |
| Capacité calorifique $C$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )    | 3770     |
| Densité massique $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )                      | 1000     |

#### III.2. Évaluation de la densité de puissance

La chambre vide a entièrement été caractérisée dans la bande de fréquence 58,5-61,5 GHz [6]. Le coefficient de qualité composite à vide est compris entre  $6,1 \times 10^4$  et  $6,4 \times 10^4$ .

Si nous introduisons un fantôme diélectrique dans la chambre vide, le coefficient de qualité total ( $Q_{\text{total}}$ ) peut être déduit du coefficient de qualité de la chambre vide ( $Q_{\text{vide}}$ ) et du coefficient de qualité associé au fantôme ( $Q_{\text{fantôme}}$ ) [7] :

$$\frac{1}{Q_{\text{total}}} = \frac{1}{Q_{\text{vide}}} + \frac{1}{Q_{\text{fantôme}}}. \quad (1)$$

Le coefficient de qualité associé au fantôme est relié à la surface équivalente moyenne d'absorption (SEMA) du fantôme notée  $\langle \sigma_a \rangle$  par l'équation :

$$Q_{\text{fantôme}} = \frac{2\pi V}{\lambda \langle \sigma_a \rangle}, \quad (2)$$

où  $V$  désigne le volume de la chambre,  $\lambda$  la longueur d'onde dans le vide. Pour un fantôme parallélépipédique,  $\langle \sigma_a \rangle$  est donnée par l'expression :

$$\langle \sigma_a \rangle \approx \frac{A}{2} \bar{T}_p. \quad (3)$$

Dans l'équation 3,  $A$  désigne l'aire physique du fantôme et  $\bar{T}_p$  représente le coefficient de transmission moyen des ondes planes incidentes sur le fantôme [9]. Connaissant le coefficient de qualité total ainsi que la puissance transmise à la CR,  $P_t$ , nous pouvons aisément déduire la densité de puissance moyenne  $\langle S_0 \rangle$  dans la CR en présence du fantôme :

$$\langle S_0 \rangle = \frac{Q_{\text{total}} P_t \lambda}{2\pi V}. \quad (4)$$

### IV. MODÈLE ANALYTIQUE DU COUPLAGE ÉLECTRO-THERMIQUE

#### IV.1. Formulation du problème

Considérons un fantôme de forme parallélépipédique de dimensions  $L_x$ ,  $L_y$  et  $L_z$ , exposé à des ondes EM dans une CR. Le gradient de température à un point local ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) du fantôme est décrit par l'équation de transfert de chaleur 3-D [8] :

$$\frac{\rho C}{k_t} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q(x, y, z, t)}{k_t}, \quad (5)$$

où  $\rho$  (kg.m<sup>-3</sup>) désigne la densité massique,  $C$  (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) la capacité thermique et  $k_t$  (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) la conductivité thermique. Le terme  $q$  (W.m<sup>-3</sup>) correspond à la quantité de chaleur induite par les ondes EM sur le fantôme. Les échanges de chaleur entre le fantôme et le milieu ambiant de température  $T_{\text{ext}}$  sont décrits par les conditions aux limites :

$$\begin{cases} k_t \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h \cdot (T - T_{\text{ext}}), \quad \forall x \in \partial\Omega_x, \\ k_t \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = h \cdot (T - T_{\text{ext}}), \quad \forall y \in \partial\Omega_y, \\ k_t \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = h \cdot (T - T_{\text{ext}}), \quad \forall z \in \partial\Omega_z, \end{cases} \quad (6)$$

où  $\partial\Omega_x \cup \partial\Omega_y \cup \partial\Omega_z$  définit la frontière de l'échantillon sous test et  $h$  désigne le coefficient de transfert de chaleur ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ). Le coefficient  $h$  modélise les échanges de chaleur par rayonnement et par convection, l'évaporation étant négligée du fait que le gradient de température expérimental n'excédera pas  $2^\circ\text{C}$ .

Pour résoudre l'équation 5, il faut lui associer une condition initiale :

$$T(x, y, z, 0) = T_{\text{ext}}. \quad (7)$$

Il reste à déterminer l'expression de la quantité de puissance dissipée sur le fantôme,  $q(x, y, z, t)$ . La puissance volumique dissipée dans un milieu à perte est donnée par la forme locale du théorème de Gauss-Ostrogradski [10]

$$P_{\text{dissip}} = -\text{Re}(\vec{\nabla} \cdot \vec{S}), \quad (8)$$

où  $\vec{S}$  est le vecteur de Poynting. Or dans une CRBM, la densité de puissance moyenne incidente sur un fantôme est reliée à l'amplitude efficace de l'amplitude des ondes planes,  $E_w$ , et à l'impédance d'onde du vide,  $\eta_0$  :

$$\langle S_0 \rangle = E_w^2 / \eta_0. \quad (9)$$

En utilisant les expressions 8 et 9 et en considérant que la densité de puissance à l'intérieur du fantôme décroît exponentiellement ( $\exp(-2z/\delta)$ ), l'expression de  $P_{\text{dissip}}$  peut être formulée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} P_{\text{dissip}} &\simeq \frac{\langle S_0 \rangle \bar{T}_p}{\delta} [\exp(-2x/\delta) - \exp(-2(L_x - x)/\delta) \\ &\quad + \exp(-2y/\delta) - \exp(-2(L_y - y)/\delta) \\ &\quad + \exp(-2z/\delta) - \exp(-2(L_z - z)/\delta)] \\ &\simeq q(x, y, z), \end{aligned} \quad (10)$$

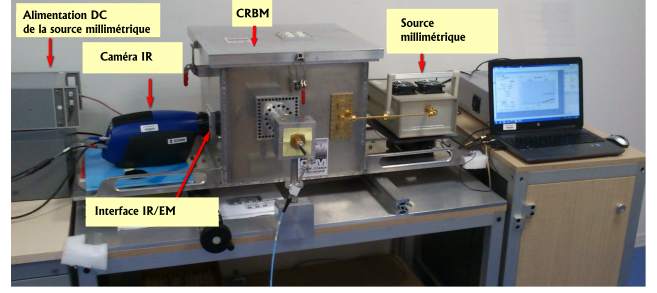
où  $\delta$  désigne l'épaisseur de peau.

## IV.2. Solution analytique

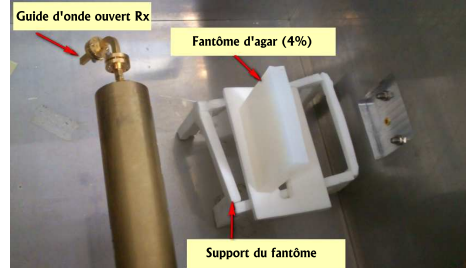
En principe, pour un fantôme de forme parallélépipédique, c'est l'équation de la chaleur 3-D qui doit être résolue. Cependant, nous nous intéressons ici au gradient de la température loin des bords du fantôme et pour une durée d'exposition limitée. Pour cela, nous pouvons nous contenter de la solution de l'équation de la chaleur 1-D ; l'équation de la chaleur 3-D peut être résolue par la même approche.

En introduisant la diffusivité thermique  $\alpha_t = k_t / \rho C$  et l'effusivité  $\zeta = h/k$ , le système d'équations équivalent au problème 1-D à résoudre, s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T_r}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_r}{\partial z^2} + \frac{q(z)}{k_t}, \text{ pour } 0 \leq z < L_z, \\ -\frac{\partial T_r}{\partial z} + \zeta T_r = 0 \text{ à } z = 0, \\ \frac{\partial T_r}{\partial z} + \zeta T_r = 0 \text{ à } z = L_z, \\ T_r = 0 \text{ à } t = 0, \end{cases} \quad (11)$$



(a)



(b)

Fig. 3. Chaîne d'instrumentation pour les mesures de température sur le fantôme exposé aux ondes millimétriques : vue externe (a) et vue interne (b) de la CR.

où  $T_r = T - T_{\text{ext}}$  correspond au gradient de température. La quantité de chaleur volumique est donnée par

$$q(z) \simeq \frac{\langle S_0 \rangle \bar{T}_p}{\delta} [\exp(-2z/\delta) + \exp(-2(L_z - z)/\delta)]. \quad (12)$$

Le système d'équations est résolu par des techniques de transformation intégrale développées dans [11]. La solution générale  $T_r(z, t)$  décrivant le gradient de température s'écrit sous la forme d'une somme infinie :

$$\begin{cases} T(z, t) - T_{\text{ext}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2}(\nu_n \cos \nu_n z + \zeta \sin \nu_n z)}{\sqrt{L_z(\nu_n^2 + \zeta^2) + 2\zeta}} \times \frac{\phi}{\alpha_t \nu_n^2} \\ \quad \times (1 - \exp(-\alpha_t \nu_n^2 t)), \\ \text{avec } \phi = \frac{\alpha_t}{k_t} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{L_z(\nu_n^2 + \zeta^2) + 2\zeta}} \\ \quad \times \int_0^{L_z} q(z)(\nu_n \cos \nu_n z + \zeta \sin \nu_n z) dz. \end{cases} \quad (13)$$

où  $\nu_n$  représentent les racines positives de la fonction :

$$\tan(\nu_n L_z) = \frac{2\nu_n \zeta}{\nu_n^2 - \zeta^2}. \quad (14)$$

## V. MESURES DE TEMPERATURE

### V.1. Principe de mesure

Une photo de la chaîne d'instrumentation pour les mesures de température et de puissance EM est présentée sur la figure 3. Un fantôme d'eau et d'agar (4%) de



dimensions  $9,9 \times 9,9 \times 1,4 \text{ cm}^3$  est positionné au centre de la CR et sur un support en mousse présentant de faibles pertes (Rohacell 51 HF,  $\varepsilon_r \sim 1$ ). Un guide d'onde ouvert WR-15 est utilisé comme élément rayonnant pour exciter la CR. La puissance dans la CR est mesurée à l'aide d'un puissance-mètre (Agilent E4418B) connecté à un guide d'onde ouvert WR-15 (Rx). L'uniformité statistique du champ est obtenue par brassage fréquentiel. Nous avons montré dans [6] que le comportement de cette CR est conforme à une CRBM classique.

La température à la surface du fantôme est mesurée, en temps réel, par une caméra IR de haute résolution (FLIR SC5000) opérant dans la bande spectrale  $2,5\text{-}5 \text{ }\mu\text{m}$ . La sensibilité de la caméra fournie par le constructeur est de  $0,025 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les images de la caméra sont enregistrées avec une résolution maximum de  $640 \times 512$  pixels. La caméra est placée à l'extérieur de la CR ; les mesures se font à travers une interface que nous avons réalisée (Interface IR/EM, Fig. 3(a)).

Le rôle de l'interface IR/EM est d'assurer, à la fois, la transmission du signal IR et le blindage du signal EM dans la bande de  $60 \text{ GHz}$ . Pour cela nous utilisons un substrat en fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) sur lequel nous imprimons une grille métallique inductive par photolithographie permettant de garantir une réflectivité élevée du signal EM dans la bande de fréquence d'utilisation. La transmission de l'interface IR/EM mesurée dans la bande spectrale de la caméra varie entre  $82,6$  et  $81,5 \%$ .

## V.2. calibrage de la densité de puissance

La calibration consiste à évaluer la densité de puissance de la CR chargée avec le fantôme. Comme nous l'avons montré en section III.2, l'estimation de la densité de puissance peut se baser uniquement sur la connaissance du coefficient de qualité total de la CR et de la puissance transmise à la chambre. Nous utilisons deux approches différentes afin de quantifier le coefficient de qualité total. La première consiste à mesurer directement celui-ci et la seconde consiste à l'évaluer à partir du coefficient de qualité de la CR vide et de la SEMA du fantôme. Les mesures de puissance sont effectuées dans la bande  $58,8\text{-}61,2 \text{ GHz}$  et en considérant  $P = 61$  positons de l'antenne de réception dans la CR. On dispose à chaque fréquence d'analyse,  $61$  séries de taille  $N = 30$  valeurs de puissance (brassage fréquentiel sur  $\Delta f = 300 \text{ MHz}$ ) issues de la mesures. Ceci conduit à  $1830$  valeurs de puissance à chaque fréquence d'analyse. En figure 4, on observe que les valeurs du coefficient de qualité évaluées à partir des deux approches sont proches (environ  $8,8 \%$ ). Notons également que l'impact du support du fantôme sur le coefficient de qualité de la chambre n'est pas très significatif ( $6,1 \%$ ).

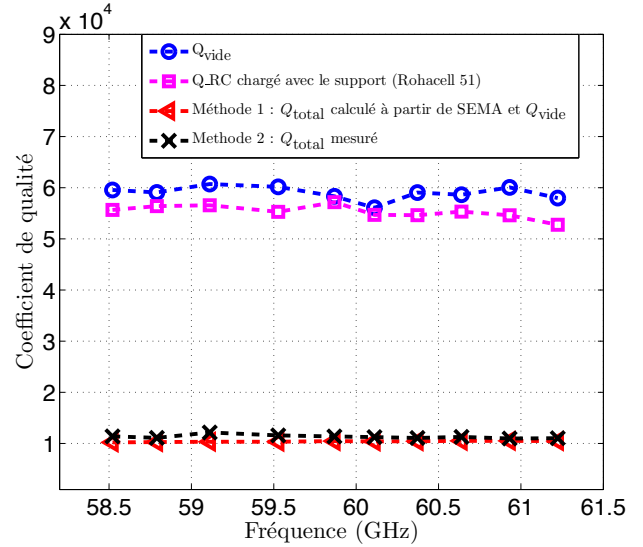


Fig. 4. Transmission en puissance de l'interface IR/EM dans la bande spectrale  $2,5\text{-}5 \text{ }\mu\text{m}$ .

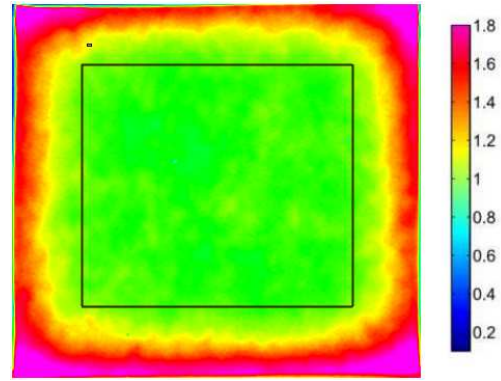


Fig. 5. Image IR de la distribution de la température à la surface du fantôme après  $300 \text{ s}$  d'exposition.

## VI. DYNAMIQUE DES MESURES THERMIQUES ET ESTIMATION DU DAS

### VI.1. Résultats de mesure de température

Les mesures sont effectuées autour de la fréquence  $f = 59,3 \text{ GHz}$  et dans une bande de fréquence  $\Delta f = 300 \text{ MHz}$  avec  $N = 30$  fréquences discrètes. Le brassage fréquentiel est réalisé en appliquant un signal DC généré par une source externe sur le générateur millimétrique. La source DC est contrôlée par Matlab via un port RS232. Le temps de balayage de la bande de fréquence  $\Delta f$  est égal à  $5 \text{ s}$ . La figure 5 représente l'image IR de la distribution de la température à la surface d'une face du fantôme ( $9,9 \times 1,4 \text{ cm}^2$ ) après  $300 \text{ s}$  d'exposition. Nous pouvons noter que la température sur les bords et les sommets du fantôme est plus élevée par rapport au centre du fantôme. Cela est lié à l'illumination des ondes EM sur les différentes faces du parallélépipède.

Dans le but de comparer les résultats expérimentaux au

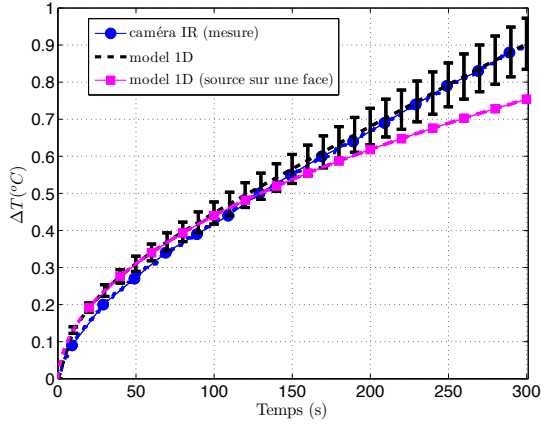


Fig. 6. Gradient de la température issue de la mesure comparé au gradient de la température calculé avec le modèle théorique pour une durée d'exposition de 300 s.

modèle théorique, l'analyse du gradient de la température expérimentale est restreinte à la face du fantôme loin des bords. Cette zone est délimitée par un rectangle (cf Fig. 5). La distribution de la température sur le fantôme est très homogène, son écart type est de 0,035 °C après 300 s d'exposition, soit 3,5 % par rapport à l'élévation de la température moyenne. En Figure 6, nous comparons le gradient de la température expérimental (courbe en bleu) au gradient de la température théorique (courbe en noir). Les barres verticales correspondent à l'intervalle de confiance à 95 % sur le gradient de la température issue du modèle théorique. L'analyse effectuée en vue de l'évaluation des intervalles de confiance est décrite dans [12]. Les mesures sont très proches des résultats théoriques. La différence relative entre le gradient de température expérimentale et théorique, après 300 s d'exposition, est de 6 %.

## VI.2. Estimation du DAS

Le DAS est défini comme la puissance absorbée par unité de masse. Son expression peut être reliée au module du champ électrique interne  $|E|$ , à la conductivité  $\sigma$ , et à la densité massique  $\rho$  de l'échantillon :

$$DAS = \frac{\sigma |E|^2}{\rho}. \quad (15)$$

Le DAS peut également être exprimé comme le produit du gradient de la température au premiers instants ( $t = 0$ ) par la capacité calorifique  $C$  du fantôme :

$$SAR = C \frac{dT}{dt} \Big|_{t=0}. \quad (16)$$

En CR, la puissance absorbée par unité de volume,  $\sigma |E|^2$ , est exprimée selon :

$$\sigma |E|^2 = \frac{\langle S_0 \rangle \bar{T}_p}{\delta} [\exp(-2z/\delta) + \exp(-2(L_z - z)/\delta)]. \quad (17)$$

Et donc le DAS local est donné par :

$$DAS(z) = \frac{\langle S_0 \rangle \bar{T}_p}{\delta \cdot \rho} [\exp(-2z/\delta) + \exp(-2(L_z - z)/\delta)]. \quad (18)$$

$DAS(0)$  correspond à la valeur maximale du DAS ( $z = 0$ ), et peut être approchée par l'expression :

$$DAS(0) \approx \frac{\langle S_0 \rangle \bar{T}_p}{\delta \cdot \rho}, \quad (19)$$

quand  $L_z \gg \delta$ .

Deux méthodes sont utilisées ici afin de déterminer le DAS max. La première est basée uniquement sur les mesures de puissance. La densité de puissance moyenne  $\langle S_0 \rangle$  est déterminée à la suite de l'étape de calibrage de la CR ( $\langle S_0 \rangle = 258 \text{ W/m}^2$ ) et le DAS est ensuite évalué en utilisant l'équation 19. Il en résulte  $DAS(0) = 396,8 \text{ W/kg}$  en supposant que le coefficient transmission moyen des ondes planes, la densité massique et l'épaisseur de peau du fantôme valent 0,523, 100 kg/m<sup>3</sup> et 0,34 mm, respectivement.

La seconde méthode consiste à ajuster la courbe théorique du gradient de la température sur la courbe expérimentale en faisant varier la densité de puissance moyenne,  $\langle S_0 \rangle$  et en minimisant la différence. Ce processus est effectué pour les premiers instants d'exposition (environ 10 à 15 s). Ensuite on détermine le DAS en utilisant la valeur de la densité de puissance obtenue, ce qui nous donne 333 W/kg. La différence relative entre les valeurs de DAS évaluées par ces deux méthodes est de 16 %. Cette différence est probablement due à l'incertitude sur les paramètres thermo-physiques du fantôme, à l'estimation de la densité de puissance, mais également à la lenteur du processus de brassage des modes.

## VII. CONCLUSION

Ce papier décrit une procédure de calibrage pour des mesures de température et de DAS sur un fantôme exposé dans une CR dans la bande de 60 GHz. Elle est basée sur des mesures de température par caméra IR à travers une fenêtre en CaF<sub>2</sub> sur laquelle nous avons imprimé une grille métallique en aluminium. Un modèle analytique permettant de prédire le gradient de la température sur le fantôme a été développé. Celui-ci est comparé au gradient de la température mesurée à la surface du fantôme. Un bon accord est observé entre les résultats théoriques et expérimentaux. Deux approches sont utilisées afin d'évaluer le DAS ; la première est basée uniquement sur les mesures de puissance et la seconde résulte du gradient de la température mesurée et du modèle théorique. La différence entre les deux valeurs de DAS est de 16 %.

## REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés par la Région Bretagne, l'Agence Nationale de la Recherche (ANR Bio-CEM, ANR-09-RPDOC-003-01), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) ainsi que l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses 2014/2 RF/004). Nous souhaitons remercier Xiang-hua Zhang, directeur de recherche à l'université de Rennes 1 pour la caractérisation du substrat en fluorure de calcium dans la bande IR. Les auteurs souhaitent également remercier Olivier de Sagazan pour la métallisation de l'interface de la caméra IR ainsi que Jérôme Sol pour l'assistance aux mesures.

## REFERENCES

- [1] K. Jung, T. Kim, J. Kim, H. Doh, Y. Chung, J. Choi, and J. Pack, "Development and validation of reverberation-chamber type whole-body exposure system for mobile-phone frequency", *Electromagnetic biology and medicine*, vol. 27, no. 1, pp. 73-82, Mar. 2007.
- [2] M. Capstick, N. Kuster, S. Kühn, V. Berdinas-Torres, J. Ladbury, G. Koepke, D. McCormick, J. Gauger, and R. Melnick, "A radio frequency radiation reverberation chamber exposure system for rodents", in *Cranfield Multi-Strand Conference: Creating Wealth Through Research and Innovation*, vol. 6, 2008, p.533.
- [3] T. Wu, A. Hadjem, M.-F. Wong, A. Gati, O. Picon, and J. Wiart, "Whole-body new-born and young rats' exposure assessment in a reverberating chamber operating at 2.4 GHz", *Physics in Medicine and Biology*, vol. 55, no. 6, pp. 1619-1630, Feb. 2010.
- [4] W. Ellison, "Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0-25 THz and the temperature range 0-100 °C", *Journal of physical and chemical reference data*, vol. 36, no. 1, pp. 1-18, 2007.
- [5] N. Chahat, M. Zhadobov, R. Sauleau, and S. I. Alekseev, "New method for determining dielectric properties of skin and phantoms at millimeter waves based on heating kinetics", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 60, no. 3, pp. 827-832, Mar. 2012.
- [6] A. K. Fall, P. Besnier, C. Lemoine, M. Zhadobov, and R. Sauleau, "Design and experimental validation of a mode-stirred reverberation chamber at millimeter waves", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 57, no. 1, pp. 12-21, Feb. 2015.
- [7] D. A. Hill, M. T. Ma, A. R. Ondrejka, B. F. Riddle, M. L. Crawford, and R. T. Johnk, "Aperture excitation of electrically large, lossy cavities" *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 36, no. 3, pp. 169-178, Aug. 1994.
- [8] K. Foster, H. Kritikos, and H. Schwan, "Effect of surface cooling and blood flow on the microwave heating of tissue", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, no. 3, pp. 313-316, May 1978.
- [9] M. Andries, C. Lemoine, and P. Besnier, "On the prediction of the average absorbing cross section of materials from coherence bandwidth measurements in reverberation chamber" in *Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2012 International Symposium on*, Sep. 2012, pp. 1-6.
- [10] J. A. Stratton, "Electromagnetic Theory". McGraw-Hill, 2006, vol. 51, no. 1312. [Online]. Available: <http://usir.salford.ac.uk/3420/>.
- [11] S. Kakaç and Y. Yener, "Heat conduction" *NASA STI/Recon Technical Report A*, vol. 86, p. 21310, 1985.
- [12] A. K. Fall, P. Besnier, C. Lemoine; M. Zhadobov, R. Sauleau, "Experimental dosimetry in a mode-stirred reverberation chamber in the 60-GHz band", in *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. PP, no.99, pp.1-12, Apr. 2016.
- [13] C. Lemoine., P. Besnier, and M. Drissi, "Estimating the effective sample size to select independent measurements in a reverberation chamber", *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 50, no 2, p. 227-236, May 2008.